



Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY  
DENMARK

## Simulering af luftbevægelse og energistrømme i bygninger

Nielsen, Peter Vilhelm

*Publication date:*  
1996

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

*Citation for published version (APA):*  
Nielsen, P. V. (1996). *Simulering af luftbevægelse og energistrømme i bygninger*. Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitet. Gul serie Bind R9620 Nr. 32

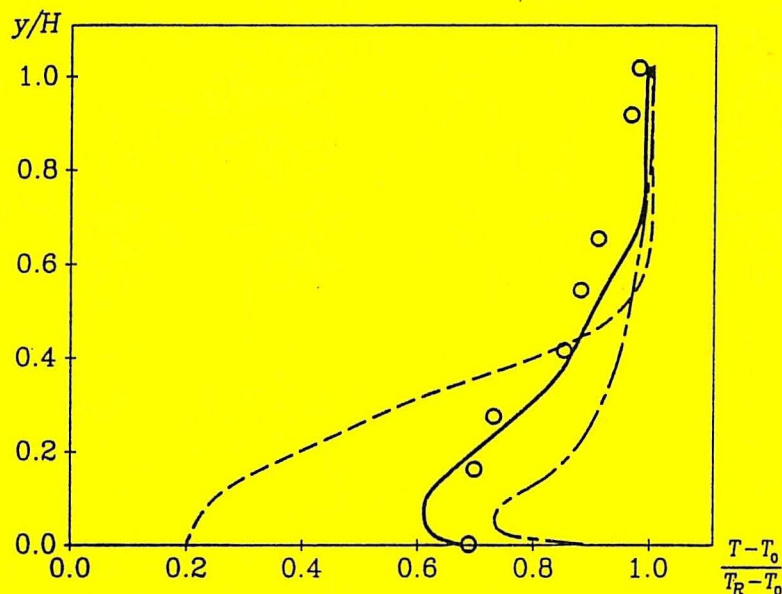
### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at [vbn@aub.aau.dk](mailto:vbn@aub.aau.dk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



Indlæg på EFP-temadag:  
Energibevist bygningsprojektering med edb

---

P. V. NIELSEN  
SIMULERING AF LUFTBEVÆGELSE OG ENERGISTRØMME I BYG-  
NINGER  
JUNI 1996

ISSN 1395-7953 R9620

---



---

# **INSTITUTTET FOR BYGNINGSTEKNIK**

DEPT. OF BUILDING TECHNOLOGY AND STRUCTURAL ENGINEERING  
AALBORG UNIVERSITET • AUC • AALBORG • DANMARK

---

**Indlæg på EFP-temadag:  
Energibevidst bygningsprojektering med edb**

---

**P. V. NIELSEN  
SIMULERING AF LUFTBEVÆGELSE OG ENERGISTRØMME I BYG-  
NINGER  
JUNI 1996**

**ISSN 1395-7953 R9620**

---

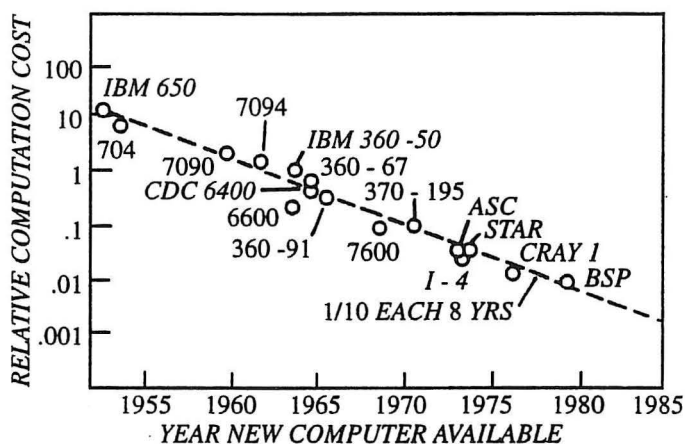
# SIMULERING AF LUFTBEVÆGELSE OG ENERGISTRØMME I BYGNINGER

af

Peter V. Nielsen  
Aalborg Universitet

## INDLEDNING

Mange tekniske områder har i de seneste årtier været påvirket af den voldsomme stigning i beregningskraft, som er til rådighed i form af centrale computeranlæg, arbejdsstationer, PC'er og lignende. Udviklingen fremgår tydeligt af kurven i figur 1, som viser beregningsomkostningernes udvikling over årene. Hvis man betragter en konkret opgave, ses det, at de nødvendige beregningsomkostninger falder med en faktor 10 hvert ottende år [1].



Figur 1. Udvikling af relativ pris for en given beregning.

Udviklingen går ikke alene imod lavere beregningsomkostninger, men der er også tale om, at regnehastigheden bliver betydeligt større. Chapman [1] giver følgende illustrative eksempel: Hvis man i 1960 skulle beregne den to-dimensionale strømning omkring et vingeprofil, ville det tage 30 år og koste 10 millioner \$. Tyve år senere - i 1980 - vil det kun tage en halv time, og det vil koste mindre end 1000 \$. I dag hører en sådan beregning til småtingsafdelingen. Der er flere årsager til dette forløb. For det første udvikler computerens kapacitet og regnehastighed sig hurtigere end dens pris, og det synes at være en tendens, der vil fortsætte. Dernæst foregår der en udvikling i fleksibilitet, som letter samkøring af den stigende mængde software, som kommer på markedet. Det skal heller ikke undervurderes, at der stadig foregår en udvikling af de numeriske modeller, som anvendes ved beregningerne.



De ovennævnte tendenser har også påvirket computerens betydning for ventilationsteknikken. Et af de første eksempler på computerberegning af strømning i ventilerede lokaler blev publiceret internationalt i 1973 [2]. Siden, og især i de seneste år, er aktiviteten steget voldsomt. Som eksempel kan nævnes, at der på den første specialkongres for luftbevægelse i rum, (ROOM-VENT) i Stockholm i 1987, var en enkelt session med emnet, mens halvdelen af ROOMVENT kongressen i 1992 i Aalborg beskæftigede sig med emnet.

Mange forskningsområder deltager i udviklingen af computerbaseret strømningsberegning. Metoden finder anvendelse i så forskellige områder som aerodynamik, forbrændingsteknik, meteorologi, miljøteknik, lægevidenskab og hydraulik, hvilket giver anledning til en stor samlet forskningsindsats på verdensplan. Et delområde som indeklimateknik bør derfor rette indsatsen imod de problemer, der skal løses for at gøre den generelle metode velegnet til de specielle forhold, der gælder for luftfordeling og energitransport i ventilationssystemer og ventilerede lokaler. Som typiske klimatekniske opgaver kan nævnes:

- *Udvikling af programmer som er specielt nødvendigt for klimatekniske anvendelser.* Her skal for eksempel nævnes metoder til simulering af ventilationsarmaturer [3], beregningsprogrammer der beskriver den faktiske eksponering af en person i et beregnet koncentrationsfelt [4], [5], og programmer der kan tage hensyn til den effekt, møblering og forhindringer i opholdszonen udøver på luftfordelingen.
- *Undersøgelse af om nyt programmer for andre strømningsmekniske anvendelser giver forbedrede løsninger på det klimatekniske område.* Som eksempel kan nævnes anvendelse af turbulensmodeller, som grundlæggende er udviklet til at løse andre strømningsmekniske problemstillinger end luftfordeling i rum. I den forbindelse skal man også være åben for, at det kan være optimalt at anvende forenklede modeller, som måske forkastes i andre forskningsområder.
- *Udførelse af målinger der kan eftervise computermodellernes anvendelighed.* Når man arbejder med udvikling af computermodeller, har det vist sig, at adgangen til målinger, der er udført med specielt henblik på at validere computermodeller, er meget væsentlig. Udvikling af en computermodel vil ofte bestå af at sammensætte delelementer, som på forskellige niveauer tager hensyn til de strømningsmekniske fænomener, der er fremherskende i klimateknikken, og kun en sammenligning med måleresultater kan afgøre den rigtige sammensætning af en model.

## GRUNDLÆGGENDE LIGNINGSSYSTEM OG NUMERISK METODE

Strømningsforhold og energiflow i et rum bestemmes ved at løse de grundlæggende ligninger for strømmingen. Der er tale om en række ligninger, som alle har følgende struktur

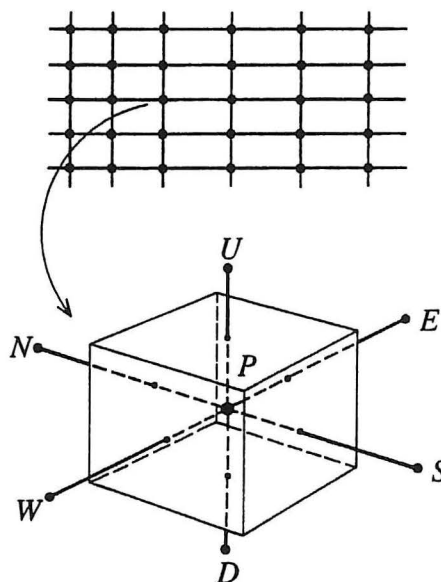
$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho w \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_{\phi} \end{aligned} \quad (1)$$

hvor  $u$ ,  $v$  og  $w$  er hastigheden i de tre koordinatretninger  $x$ ,  $y$  og  $z$ . Det ses, at ligningen beskriver transporten af størrelsen  $\phi$  med de konvektive bidrag på venstre side af lighedstegnet og diffusion samt kildeled  $S_\phi$  på højre side af lighedstegnet.

Det komplette ligningssystem for strømmingen består af kontinuitetsligningen, en ligning for bevægelsesmængdestrøm i hver koordinatretning (Navier-Stokes' ligninger), energiligningen samt transportligningen for massefraktion. Kontinuitetsligningen kan udtrykkes ved at sætte  $\phi = 1$  i (1). De øvrige ligninger kan opstilles ved at lade variabelen  $\phi$  i ligning (1) beskrive henholdsvis de tre hastigheder  $u$ ,  $v$  og  $w$ , temperaturen  $T$  samt koncentrationen  $c$ .

Alle ligninger betragtes som tidsmidlede ligninger, hvor den lokale turbulens indgår som en variabel diffusion i form af en turbulent viskositet  $\mu_t$ . Denne størrelse bestemmes ofte ud fra endnu to transportligninger, nemlig en transportligning for turbulent kinetisk energi  $k$  og en transportligning for dissipation af turbulent kinetisk energi  $\varepsilon$  [6].

Den samlede beskrivelse af strømmingen består således af otte koblede, ulineære differentialligninger med den struktur, som er indikeret i ligning (1). Disse ligninger kan ikke løses direkte, så der opstilles en numerisk metode, hvor differentialligningerne erstattes af differensligninger.



Figur 2. Netpunktsfordeling samt kontrolvolumen omkring et enkelt netpunkt  $P$ .

Strømningsfeltet opdeles i et antal netpunkter som vist i figur 2. Der opstilles et kontrolvolumen omkring hvert netpunkt, som afgrænser dette punkt  $P$  fra nabopunkterne  $E$ ,  $W$ ,  $N$ ,  $S$ ,  $U$  og  $D$ . De otte differentialligninger, der gælder for hele løsningsfeltet, erstattes af otte differensligninger i hvert netpunkt.

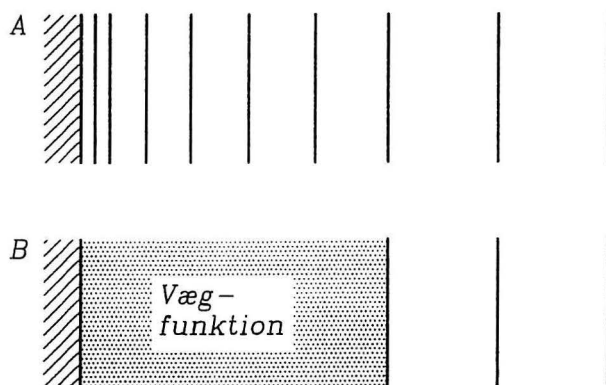
Der anvendes forskellige diskretiseringsmetoder ved formuleringen af differensligningen, som det er beskrevet af Patankar [7], men i princippet består metoderne af at opstille en balanceligning omkring det volumen, der omslutter punkt  $P$ . Differentialerne i ligning (1), som for eksempel  $\partial\phi/\partial x$ , erstattes af endelige differencer til nabopunkterne som  $(\phi_P - \phi_W)/\Delta x$  og  $(\phi_E - \phi_P)/\Delta x$ , og kildeleddet  $S_\phi$  indføres med de aktuelle værdier  $S_\phi \Delta x \Delta y \Delta z$  i de enkelte

kontrolvoluminer. Alt i alt kan ligning (1) omskrives til følgende differensligning i de enkelte punkter

$$a_P \phi_P = a_W \phi_W + a_E \phi_E + a_N \phi_N + a_S \phi_S + a_U \phi_U + a_D \phi_D + b \quad (2)$$

Hvis der anvendes et netpunktsantal på  $31 \times 31 \times 31$ , får man i alt  $31 \times 31 \times 31 \times 8$  differensligninger med det samme antal ubekendte  $\phi$ . Ligningen løses ved iteration. Tidligere anvendte man en Gauss-Seidel iteration for de enkelte punkter, men i dag anvendes ofte en direkte metode for de enkelte netlinier, Tri-Diagonal-Matrix algoritmen, kombineret med en Gauss-Seidel iteration for linierne.

Som nævnt i indledningen muliggør det nye computerudstyr en stigning i regnehastigheden fra år til år, så derfor vil løsningen af  $31 \times 31 \times 31 \times 8 \sim 240000$  differensligninger måske ikke være det store problem i de kommende år. Det viser sig dog, at det nødvendige antal iterationer til opnåelse af en passende nøjagtig løsning stiger med antallet af netpunkter. Medens man i halvfjerdsere kunne nøjes med 200 iterationer for at løse 5 transportligninger i  $17 \times 17$  netpunkter, se [2], anvender man i dag 5000 iterationer for at løse 8 ligninger i  $31 \times 31 \times 31$  netpunkter. Dette forhold betyder, at man ved planlægning af en opgave stadig må være økonomisk med anvendelsen af netpunkter.

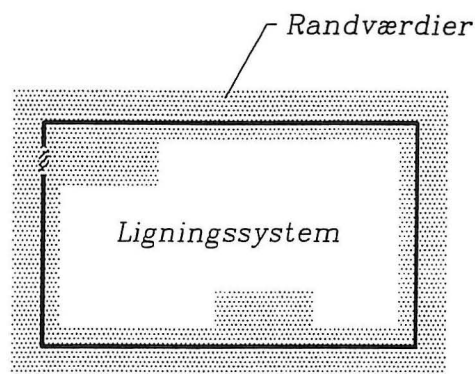


Figur 3. Netpunktsfordeling tæt ved en begrænsningsflade med og uden vægfunktioner.

Det er nødvendigt at placere netpunkterne tæt, hvor gradienterne er store, medens man kan tillade sig at holde større afstand i områder, hvor der er små gradienter som for eksempel midt i et lokale, langt fra begrænsningsflader og langt fra betydende strømninger. Figur 3A viser, hvorledes det er nødvendigt med en meget tæt placering af netpunkter ved en begrænsningsflade, fordi vi der har de største gradienter i lokalet. Da strømmingen også kan have en universal karakter tæt ved en flade, er det muligt at erstatte den beregnede gradient med en analytisk givet gradient i form af en vægfunktion, figur 3B. Man kan således gennemføre en numerisk simulering af en situation, der burde kræve  $51 \times 51 \times 51$  punkter med et punktantal på  $31 \times 31 \times 31$  punkter ved brug af vægfunktioner. Netpunktsantallet er reduceret med en faktor på 0,22, selvom vægfunktionerne kun dækker meget få procent af et lokales volumen. De vægfunktioner, der generelt anvendes ved computersimulering af strømning, er ikke de bedst egnede til klimatekniske beregninger, og der foregår i øjeblikket en udvikling af nye typer, som tager hensyn til den naturlige konvektion, der især dannes langs lodrette flader i store lokaler som atrier [8].



Der kræves også et meget stort netpunktsantal til direkte simulering af et indblæsningsarmatur på grund af de mange geometriske detaljer, der er i en sådan konstruktion. Derfor er der også udviklet metoder - *box metoden* og *prescribed velocity metoden* - som kan anvendes til at reducere forbruget af netpunkter i forbindelse med armaturer, Nielsen [3].



Figur 4. Randværdier omkring et løsningsfelt for strømningsberegning.

En computermodele består i princippet af et sæt algebraiske ligninger (2), der skal løses i et strømningsfelt, som er afgrænset af givne randværdier, se figur 4. Det er forholdsvis simpelt at beskrive randværdierne ved de fleste strømnings tekniske beregninger men netop inden for luftstrømningsberegninger i rum, kan der opstå en del problemer. Derfor er randværdibeskrivelser et af de væsentlige forskningsområder for klimabranschen, og det er en opgave, som branchen må løse alene.

Man skal være opmærksom på, at en beregningsmetode ikke er bedre end det svageste led i den kæde af elementer, der beskriver metoden. Det er meget karakteristisk, at dårlige beregningsresultater ofte skyldes problemer med randværdibeskrivelsen, selvom der i udviklingsarbejdet generelt lægges meget vægt på andre ting som for eksempel turbulensmodeller og numeriske metoder.

## ANVENDELSESSTRATEGI

I det følgende skal der nævnes en række forhold, som er med til at gøre numerisk simulering af luftstrømning i rum til en attraktiv beregningsmetode.

- Der kan laves beregninger i vilkårlig stor målestok og i komplicerede geometrier.
- Beregningsmetoden kan give alle primære værdier for termisk komfort og luftkvalitet overalt i lokalet både under designbetingelser og under andre driftsforhold.
- Beregningsmetoden kan give det nødvendige grundlag for bestemmelse af størrelser, der bygger på mange data, og den kan bestemme regnestørrelser, der ikke kan måles.
- Beregningsmetodens resultater kan præsenteres på en overskuelig måde for en kunde ved hjælp af avanceret farvegrafik.

- Numerisk simulering af luftstrømning kan kombineres med andre beregningsprogrammer, så der kan skabes en komplet beskrivelse af en bygning, hvad angår konstruktion, klima og energiforbrug.

Programmer til numerisk simulering af luftstrømning kan anvendes på forskelligt niveau alt efter opgavernes karakter. Der kan være tale om at udvikle en databasemodel, eller programmet kan anvendes til at udvikle en model, der delvis bygger på flowelementer, som det skal vises i det følgende. Derudover kan der naturligvis være tale om at arbejde med simplificerede antagelser eller med den detaljerede geometri. Disse modeller kan derefter sammenkobles med energiberegningsprogrammer og andre programmer, så der kan skabes en komplet beskrivelse af bygning, system, klima og energiforbrug.

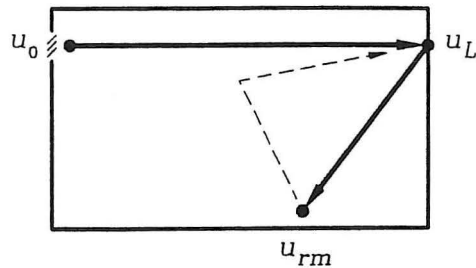
### **Databasemodel**

I forbindelse med det Internationale Energi Agenturs Annex 20 arbejde udarbejdede Chen et al. [9] et atlas over løsningsresultater for rum af kontorstørrelse med enten opblandingsventilation eller fortrængningsventilation. Der blev arbejdet med 9 uafhængige parametre, hvoraf de tre første hovedparametre var rumdimension, placering af armatur og termisk belastning samt volumenstrøm. Argumentet for dette arbejde var, at det regneteknisk ville være hurtigere og billigere at finde en standardløsning som dimensioneringsgrundlag end at bestemme strømningsforholdene i en given situation. Hvis man forestiller sig, at hver parameter skal varieres med mindst 4 værdier, skal der skabes et atlas ud fra  $4^9 \sim 262000$  sæt randværdier. De seneste års udvikling af PC-baserede strømningsprogrammer er ved at gøre denne metode uinteressant, da de løsninger, man vil finde i en databasemodel, i alle tilfælde vil være en tilnærmet løsning til en faktisk situation.

### **Parametervariation baseret på flowelementmodeller**

En flowelementmodel bygger på den antagelse, at man kan betragte strømning i forskellige elementer som uafhængige af omgivelserne. For eksempel anser man strømning i en stråle under loftfladen for at være uafhængig af strømningen i det øvrige rum og afbøjningen af en stråle for kun at være påvirket af lokale forhold.

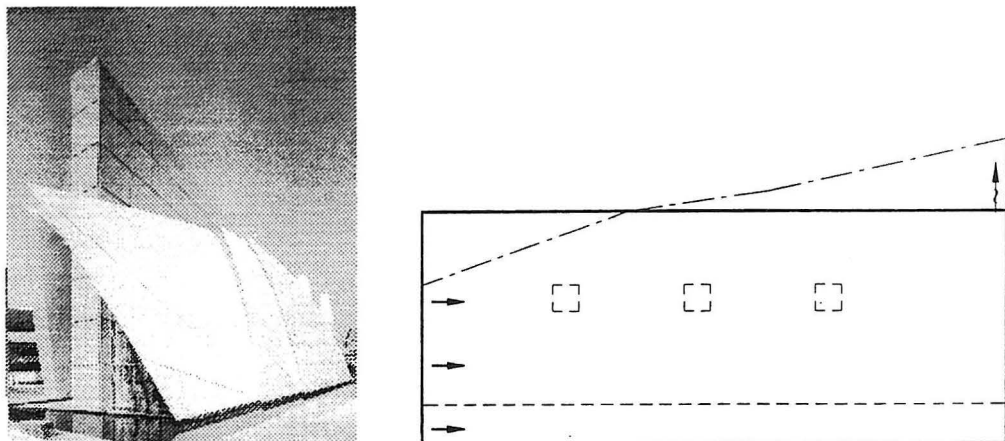
Figur 5 viser, hvorledes man kan betragte den - i princippet elliptiske - recirkulerende strømning som en parabolisk strømning. Den hastighed  $u_L$ , man får i en vægstråle med længden  $L$  (lokalelængden), er således uafhængig af resten af lokaledimensionen men meget afhængig af indblæsningsarmatur og montage. (Dette er et forhold, der udnyttes med succes, når der dimensioneres efter en kastelængdemetode). Den maksimale hastighed i opholdszonen kan herefter gøres til en funktion af  $u_L$  i stedet for  $u_o$  og de øvrige parametre, der påvirker  $u_L$ . Man opnår derfor en mere overskuelig beskrivelse af de sammenhænge, der påvirker  $u_{rm}$  end den, man vil opnå i en databasemodel, se [10] og [11]. Det er også muligt at anvende måleværdier i nogle af beskrivelserne. Således vil det være hensigtsmæssigt at bestemme  $u_L = f(u_o)$  via måleværdier for forskellige armaturer og samle værdier i et analytisk udtryk for en stråle i stedet for at foretage denne bestemmelse ved hjælp af computersimulering.



Figur 5. Skitsen illustrerer, hvorledes strømmingen i et givet område hovedsageligt er påvirket af forhold i modstrømsretning, medens den kun er lidt påvirket af det videre forløb via den recirkulerende luftbevægelse.

### Strømningssimulering i rum med simplificeret geometri

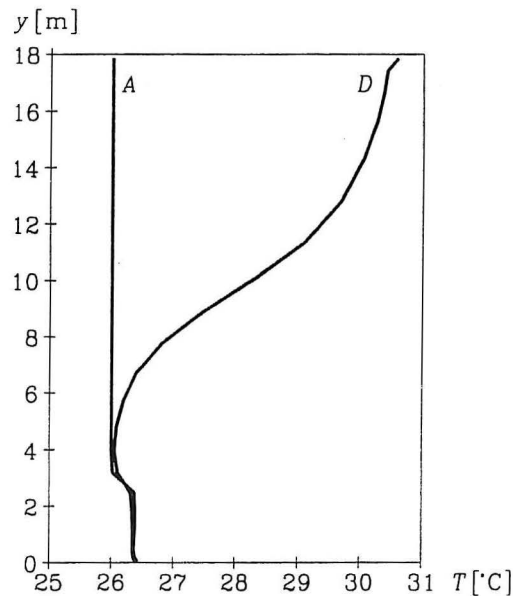
Det er tidskrævende at opstille de detaljerede randværdier i forbindelse med en beregning. Derfor kan det være hensigtsmæssigt at anvende simplificerede geometrier i den indledende fase, hvor det kan dreje sig om at afprøve for eksempel egnetheden af et bestemt ventilationsprincip.



Figur 6. Den Danske Pavillon i Sevilla og randværdien for en simplificeret model.

Figur 6 viser et eksempel på anvendelse af en simplificeret geometri. Der skal i designfasen laves en undersøgelse af luftstrømningsforholdene i den danske bygning på verdensudstillingen i Sevilla i 1992. Restaurant og udstillingslokale er 45 m langt. Rummet har en bredde, der varierer fra 7 m til 14 m, og rummets højde varierer fra 12 m til 24 m. Endevæggen, der er 12 m høj, er opbygget som en stor vandkølet varmeveksler, og luften trækkes igennem denne væg ved hjælp af en tagmonteret udsugningsventilator. Det ses, at der er tale om en kompliceret geometri og et utraditionelt luftfordelingsprincip. Det er vigtigt at afgøre, om der opstår træk i området tæt op ad den 12 m høje "diffusor", samt at undersøge om varmeudviklingen fra højt placeret AV-udstyr kan fjernes uden at belaste opholdszonen.

Figur 6 viser, hvorledes strømmingen undersøges i en simpel rektangulær geometri under forudsætning af en to-dimensional luftbevægelse. En beregning viser, at hastigheden i opholdszonen bliver på 0,6 m/s. Dette svarer til den værdi, der findes ved modelforsøg, og det er tæt ved den målte værdi i fuld skala, Fox og Nielsen [12].



Figur 7. Beregnet lodret temperaturfordeling i udstillingslokale.

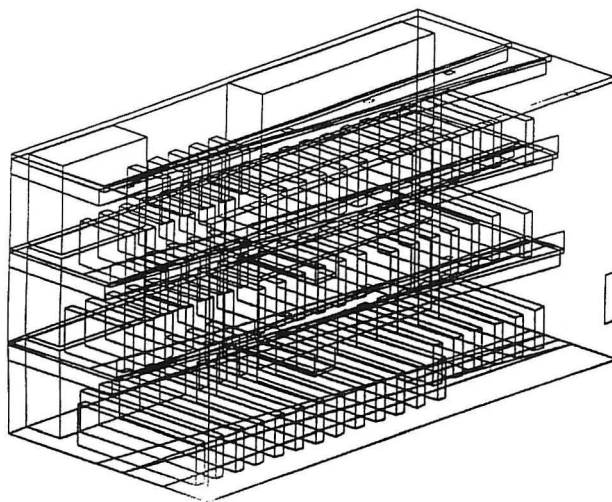
Figur 7 viser den lodrette temperaturfordeling uden og med varmeafgivelse fra AV-udstyr, [13]. Det ses, at det er muligt at fjerne 130 kW fra det højt placerede udstyr, uden det får nogen indflydelse på temperaturniveauet i opholdszonen.

Opstilling af randværdier og gennemførelse af et antal beregninger i den simplificerede geometri tager et par timer for en rutineret bruger af et simuleringsprogram. Eksemplet viser en nyttig anvendelse af numerisk strømningsberegning, hvor man i en tidlig fase kan få svar på nogle indledende spørgsmål, som kan være med til at understøtte et fortsat designarbejde på et nyt projekt.

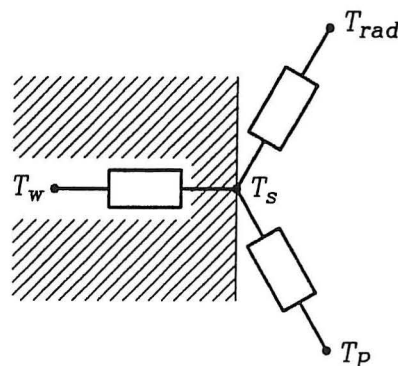
### Strømningsberegning i aktuel geometri

Numerisk strømningsberegning kan gennemføres i alle forskellige former for geometri, hvis der er tilstrækkelig regnekraft til rådighed. Dette er en meget stor fordel, når der skal designs et luftfordelingssystem til utraditionelle bygninger som atrier, overdækkede gågader og andre store konstruktioner, hvor det er vanskeligt at bygge på en tidligere erfaring.

Figur 8 viser specifikationer af geometrier og randværdier i atriet på Det Kongelige Bibliotek, se Heiselberg [14]. Atriet rummer tre etager med reoler og et gennemgående åbent volumen. Tagfladen og en del af sidevæggene er beklædt med glas, hvilket vil give solindfald på de forskellige etager. Som det ses, er der tale om en kompliceret geometri, så alene specifikationen af geometrien kan tage op til flere dage for en trænet operatør, selvom der anvendes et program med en god brugerflade.



Figur 8. Specifikation af geometri for Det Kongelige Bibliotek på Amager, Heiselberg, [14].



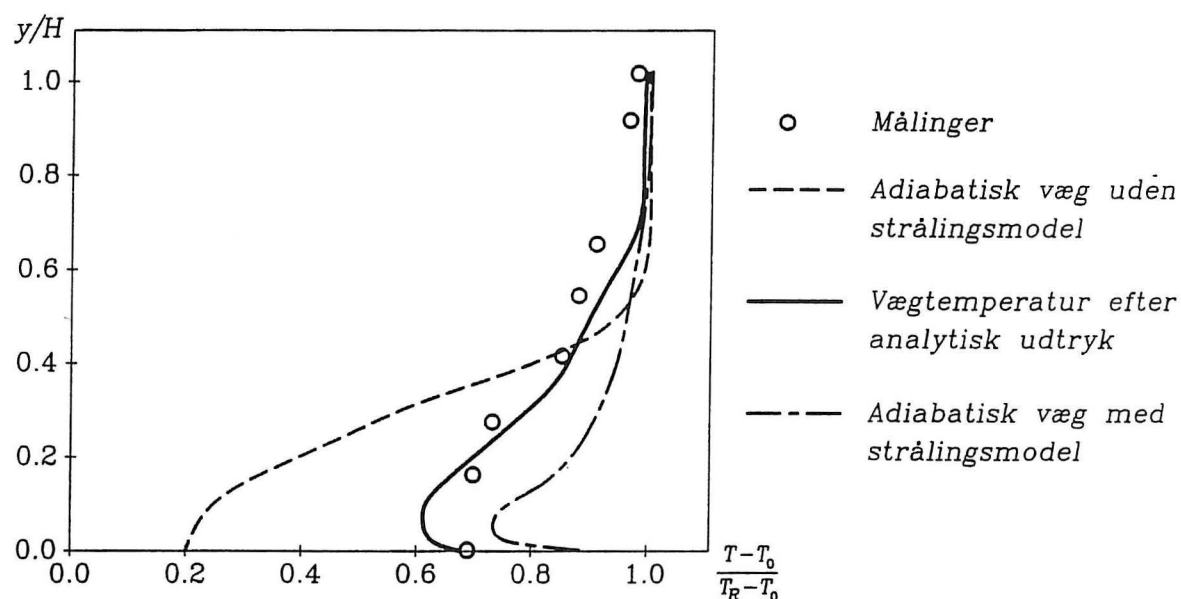
Figur 9. Vægtemperaturen  $T_s$  er givet som en energibalance imellem ledning, stråling og konvektion.

Beskrivelsen af randværdien for temperaturfeltet (vægtemperaturen) kan give anledning til problemer. Vægtemperaturen  $T_s$  opstår som en balance imellem varmeledning, stråling og konvektion, se figur 9. Varmeledningen er repræsenteret ved en temperatur  $T_w$  og en modstand, og der kan være tale om ledning både til og fra væggen. Strålingen er antydnet med en strålingstemperatur  $T_{rad}$ , og i mange praktiske situationer er det nødvendigt at specificere både den langbølgede stråling og den kortbølgede stråling (synlig stråling) inklusiv skyggevirkning og refleksion. Konvektionen imellem overfladen og det første netpunkt  $P$  er i figur 9 illustreret ved temperaturerne  $T_s$  og  $T_p$ . Det kan være vanskeligt at beregne varmeovergangen ud fra vægfunktionerne, fordi disse giver en dårlig beskrivelse af temperaturgradienten, og en direkte beregning af gradienten ved at undlade brugen af vægfunktioner vil ofte kræve et alt for stort netpunktsantal, som det er omtalt i afsnittet om den numeriske metode. Den konvektive varmeovergang kan beregnes ud fra givne erfaringsværdier for varmeovergangstal med de unøjagtigheder, der er forbundet med denne metode, se for eksempel DS 418 [15].



Oprindeligt var der ikke megen fokus på betydningen af randværdien  $T_s$ . Ved simulering af opblandingsventilation er det den tilførte bevægelsesmængdestrøm, der styrer strømningen i rummet, så i denne situation har randværdien kun en lille indflydelse på den termiske komfort i lokalet. Forholdene bliver anderledes, når der sættes fokus på energistrømmene i bygningen, og problemet bliver større, når der skal udføres simuleringer af fortrængningsventilation, hvor det er de termiske kræfter, der styrer strømningen.

I en stor konstruktion som et højt atrium er bestemmelsen af randværdien  $T_s$  meget vigtig. Direkte solindfald, skyggevirkning og reflekser gør beregningen af  $T_s$  vanskelig, men den har stor betydning for fastlæggelsen af energistrømme, for bestemmelsen af termisk kapacitet af bygningen og for klimaet i opholdszonen. Den naturlige konvektion får en stigende indflydelse på luftfordelingen ved forøget højde af konstruktionen, da lufthastigheden i konvektionen stiger med kvadratroden af fladernes højde, medens lufthastigheden fra armaturer ofte falder omvendt proportionalt med afstanden.



Figur 10. Lodret temperaturgradient i et lokale med fortrængningsventilation, Jacobsen og Nielsen [16].

Figur 10 illustrerer problemet med at bestemme den rette randværdi  $T_s$  for energiligningen. Den enkleste beskrivelse er at antage, at randen er adiabatisk, dvs. man ser bort fra ledning og stråling ( $T_s = T_p$ ). Det ses af figuren, at den beregnede temperaturgradient i et lokale med fortrængningsventilation ligger langt fra de målte værdier. Kurveforløbet vil svare til det, man ville finde, hvis man havde udført modelforsøg i vand, hvor det ikke er muligt at tage hensyn til stråling. Vægtemperaturen  $T_s$  kan også gives ud fra et analytisk udtryk. I dette tilfælde anvendes en lineær beskrivelse af temperaturen fra  $T_0 + 0,7 \Delta T_0$  ved gulv til  $T_0 + \Delta T_0$  ved loft. Ud fra denne beskrivelse af  $T_s$  bestemmes  $T_p$  ved hjælp af vægfunktionen, og det ses, at resultatet svarer rimeligt til målingerne. Problemet med denne metode er, at man indfører en temperaturfordeling  $T_s$ , som egentlig burde være et resultat af beregningerne. Den sidste kurve i figur 10 viser resultatet af at regne med en isolerende væg og en strålingsmodel ( $T_w = T_s$ ). Den beregnede temperaturfordeling er påvirket af den manglende ledning igennem væggen og giver derfor ikke det fulde grundlag for bestemmelse af  $T_s$ .

Ved beregning af temperaturfordeling og lufthastigheder i Det Kongelige Biblioteks nye bygning, figur 8, bliver solindfald og energistrømme i bygningskonstruktionen bestemt indledningsvis med separate programmer. Dette arbejde tager et par uger, og det er således af et tidsmæssigt større omfang end selve strømningsberegningen.

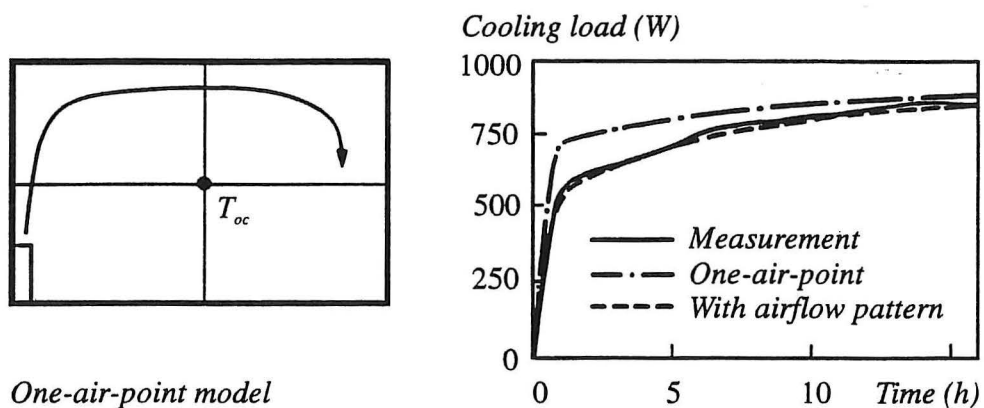
Li, Fuchs og Sandberg [17] samt Moser et al. [18] har lavet en model, som inddrager vægge, gulv og loft i beregningens netpunkter. Denne model tager således hensyn til både ledning, stråling og konvektion, men det er nødvendigt at kende temperaturfordelingen i de omgivende rum, hvilket illustrerer problemet med at bestemme den endelige randværdi.

### Samkøring af bygningstekniske programmer

Samkøring af programmer inden for bygningsteknik er en logisk konsekvens af, at computere får større og større regnekraft. I det følgende skal vi illustrere de muligheder, der åbner sig ved denne udvikling.

Man kan tale om et overordnet system kaldet "Computer Aided Architectural Design" (CAAD), der administrerer alle de programmer/modeller, der indgår i bygningskonstruktion, opførelse og vedligeholdelse. Det kan både være programmer af kvalitativ art så vel som programmer af kvantitativ art. Blandt de første kan nævnes programmer, man bruger til at studere en bygnings udseende både udefra og indefra. De kvantitative programmer kan fx være et strømningssimuleringsprogram, et program til beregning af konstruktionens styrke, et program for energiberegning, og et program hvor man beregner de strømningstekniske forhold uden for bygningen. Programsystemet indeholder som noget grundlæggende hele tegningsgrundlaget for byggeriet, hvilket kan gøre de kvantitative programmer brugervenlige, fordi tegningsgrundlaget giver et komplet sæt indgangsdata. Dette kan for eksempel være med til at give en væsentlig forkortelse af den tid, der anvendes til opstilling af geometri i strømningsprogrammet.

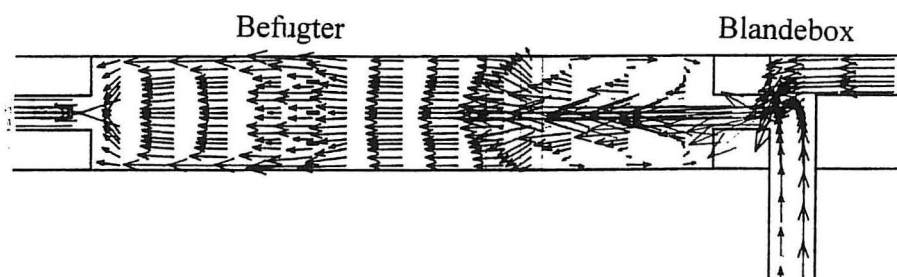
De tidligere omtalte problemer med fastlæggelse af temperaturfordeling og energiflow ved vægfladen kan afhjælpes ved at samkøre et dynamisk energiberegningsprogram med et strømningssimuleringsprogram. Energiberegningsprogrammet kan bestemme varmeledningen imellem rummene samt strålingsudvekslingen, og strømningsprogrammet kan nu fastlægge energistrømmen i ventilationsluften og energistrømmen til og fra fladerne.



Figur 11. Et-punkt-model og tidsafhængig kølebelastning af et rum.

Figur 11 giver et eksempel på den forbedring, man får ved at samkøre et dynamisk energiberegningsprogram med et strømningsprogram, Chen og Kooi [19]. I den dynamiske model bestemmer man ofte kun lufttemperaturen i et enkelt punkt i rummet, dvs. det forudsættes, at temperaturfeltet er helt homogent. Chen og Kooi har opstillet en database med et antal karakteristiske situationer, og figuren viser de forbedrede resultater. 950 W tilføres til et lokale som en stepfunktion. Belastningen er bestemt som volumenstrøm til rummet ganget med temperaturdifferensen imellem udsugning og indblæsning. Et-punkt-modellen tager ikke hensyn til en lodret temperaturgradient og dermed en forøget varmetransmission igennem lokalets loft, medens et temperaturfelt baseret på en strømningsberegning giver en god overensstemmelse imellem måling og beregning.

Samkøring af programmer vil åbne for en synergieffekt. Ved bestemmelse af luftkvalitet forudsætter man ofte, at der hersker fuld opblanding i et lokale, og denne antagelse kan give anledning til store afvigelser i decipolværdierne. Når man først har fået etableret en geometri, som den der er vist i figur 8, og løst strømningsligningerne, er det forholdsvis enkelt at udvide beregningerne med endnu en transportligning af formen (1), hvor massefraktionen  $c$  er den ubekendte variabel  $\phi$ . En løsning af denne transportligning, sammen med de randværdier som fremgår af materialebeskrivelsen, vil give en beregnet koncentrationsfordeling, som tager korrekt hensyn til emissionskilders placering og ventilationsvirkningsgrad.



Figur 12. Strømningssimulering af blandebox og befugter, Alamdari [20].

Figur 12 viser et andet eksempel på synergieffekt ved anvendelse af koblede programmer. Strømningssimuleringen i befugteren foregår samtidig med, at der udføres en beregning af fugtfordeling i et rum, og simuleringerne tager hensyn til recirkulationsluft fra rummet. Der er således tale om en kobling imellem et strømningsprogram til bestemmelse af luftfordeling i rum og et program til bestemmelse af strømmingen og energiflowet i en ventilationskomponent. Denne kobling imellem de to områder er med til at simplificere beskrivelsen af randværdier for ventilationssystemer og luftfordelingssystemer.

## LITTERATUR

- [1] Chapman, D.R., Computational Aerodynamics Development and Outlook, AIAAJ, Vol. 17, pp. 1293 - 1313, 1979.
- [2] Nielsen, P.V., Berechnung der Luftbewegung in einem zwangsbelüfteten Raum, Gesundheits-Ingenieur, oktober 1973.

- [3] Nielsen, P.V., Description of Supply Openings in Numerical Models for Room Air Distribution, ASHRAE Transaction, Vol. 98, Part 1, 1992.
- [4] Brohus, H. og Nielsen, P.V., Personal Exposure in Displacement Ventilated Rooms, Submitted to Indoor Air, 1994.
- [5] Brohus, H. og Nielsen, P.V., Personal Exposure to Contaminant Sources in a Uniform Velocity Field, Healthy Building '95, Milano, 1995.
- [6] Launder, B.E., Spalding, D.B. og Whitelaw, H.J., Turbulence Models and their Experimental Verification, Imperial College, Heat Transfer Section, Reports HTS/73/16-30, 1973.
- [7] Patankar, S.V., Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corporation Washington, 1983.
- [8] Yuan, X., Wall Functions for Numerical Simulation of Natural Convection along Vertical Surfaces, Ph.D. thesis, ETH Nr. 11073, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, 1995.
- [9] Chen, Q., Moser, A. og Suter, P., A Database for Assessing Indoor Airflow, Air Quality, and Draught Risk, International Energy Agency Annex 20, ISBN 90-9004682-8, ETH, Zürich, 1992.
- [10] Nielsen, P.V., Luftstrømning i Ventilerede Arbejdslokaler, SBI-rapport 128, Statens Byggeforskningsinstitut, 1981.
- [11] Nielsen, P.V., Models for the Prediction of Room Air Distribution, Proc. of the 12th AIVC Conference, ISBN 0 946075 530, AIVC, Warwick, 1991.
- [12] Fox, S.G. og Nielsen, P.V., Model Experiments in 1990 and On-Site Validation in 1992 of the Air Movement in the Danish Pavilion in Seville, INDOOR AIR '93, Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 2, Helsinki, 1993.
- [13] Nielsen, P.V., Airflow in a World Exposition Pavilion Studied by Scale-Model Experiments and Computational Fluid Dynamics, ASHRAE Transaction, V. 101, Pt. 2, 1995.
- [14] Heiselberg, P., Anvendelse af CFD til Beregning af Luftstrømningsforhold i Atrier, Aalborg Universitet, 1996.
- [15] Dansk Standard, DS 418, Dansk Ingeniørforenings regler for beregning af Bygnings-varmetab, 5. udgave, 1986.
- [16] Jacobsen, T.V. og Nielsen, P.V., Numerical Modelling of Thermal Environment in a Displacement-Ventilated room. INDOOR AIR '93, Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Vol. 5., Helsinki, 1993.

- [17] Li, Y., Fuchs, L. og Sandberg, M., Numerical Prediction of Airflow and Heat-Radiation Interaction in a Room with Displacement Ventilation, *Energy and Buildings*, V. 20 (1), 1993.
- [18] Moser, A., Frank, O., Schälin, A. og Yuan, X., Numerical Modeling of Heat Transfer by Radiation and Convection in an Atrium with Thermal Inertia, *ASHRAE Transactions*, V. 101, Pt. 2, (1995).
- [19] Chen, Q. og Kooi, J., ACCURACY - A Program for Combined Problems of Energy Analysis, Indoor Airflow and Air Quality, *ASHRAE Transactions*, Vol. 94, part 2, pp. 196-214, 1988.
- [20] Alamdari, F., Privat kommunikation, The Building Services Research and Information Association, Bracknell, 1993.





